

# InP(001)(2×4) 재구성된 표면 위에 원자층 단위로 증착된 Co 박막의 자성 특성

박용성 · 정종률 · 이정원 · 신성철\*

한국과학기술원 물리학과 및 스핀정보물질연구단, 대전 305-701

(2004년 4월 7일 받음, 2004년 6월 18일 최종수정본 받음)

본 연구에서는 InP(2×4) 재구성된 표면 위에 원자층 단위로 증착된 Co 박막의 특성을 표면 자기광 커 효과(surface magneto-optical Kerr effect, SMOKE) 시스템, 반사 고에너지 전자 회절(reflection high energy electron diffraction), 주사 터널링 현미경(scanning tunneling microscope)이 장착된 초고진공 챔버를 이용하여 조사하였다. 실시간(*in situ*) SMOKE 연구 결과, Co 박막이 InP(2×4) 재구성된 표면 위에 성장할 때, Co 박막의 두께에 따라 자성 특성이 대조적으로 구분되는 세 가지 두께 영역이 존재함을 확인할 수 있었다. 즉, Co 박막 두께가 7 단층(monolayer, ML)보다 작은 두께 영역에서는 가로 방향(longitudinal)과 수직 방향(polar)의 측정에서 모두 SMOKE 신호를 관찰할 수 없었다. 8 ML에서 15 ML까지의 Co 두께 영역에서는 수평 자기 이방성과 수직 자기 이방성이 공존하는 준안정상(metastable phase)을 관찰할 수 있었다. 그리고 마지막 영역은 16 ML 이상의 두께를 갖는 영역으로 수평 자기 이방 강자성을 확인할 수 있었다.

주제어 : InP(2×4) 기판, STM, SMOKE 측정, Co 박막

## I. 서 론

S. Datta와 B. Dass가 1990년 스핀트로닉스에 대한 가능성을 처음 제기한 이후로[1], 자성체/반도체의 이중접합 시스템이 스핀트로닉스 기술 구현을 위한 기초 연구로 활발히 진행되고 있다. 이러한 목적으로 최근 들어 Fe/GaAs의 복합계(hybrid system)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[2, 3]. 그러나 낮은 자기 주입 효율이 문제점으로 남아있다. 한편 최근 연구에 따르면 자성반도체를 이용해서 높은 자기 효율을 얻었다고 보고 되고 있으나, 작동을 위해서 저온과 강한 자기장이 필요하다는 제한 때문에 실용화에 걸림돌로 작용하고 있다[4, 5]. 따라서 스핀트로닉스 기술 구현을 위해서는 상온과 낮은 자기장으로 실용화가 가능한 자성체/반도체 시스템을 찾는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다.

InP는 대표적인 III-V족 반도체로 직접 띠틈격(direct bandgap)과 높은 나르개 이동도(carrier mobility) 등의 성질 때문에 이미 태양전지, 레이저 다이오드, LED, 그리고 광 검출기 등 산업적으로 널리 쓰이고 있다[7]. 한편 강자성 금속으로 잘 알려진 Co는 페르미 준위에서 높은 스핀 불균형을 갖는 성질 때문에 거대자기저항 장치에 많이 쓰이고 있다[8]. 따라서 Co/InP 시스템에 대한 연구는 기술적 측면에서도 매우 흥미 있는 주제이며, Fe/GaAs나 Fe/InP 등과는 달리 연구가 거의 되어 있지 않다는 점에서 이에 대한 연구는 중요한 의미를 갖는다. 본 연구에서는 때려내기(sputtering)와 불림(annealing)을 반복적으로 시행하여 만들어진 원자 크기 정

도로 편평한 InP(2×4) 재구성된 표면 위에 Co를 단층(monolayer, ML) 단위로 증착하여, 실시간(*in situ*)으로 표면 자기광 커 효과(surface magneto-optical Kerr effect, SMOKE) 장비를 이용하여 Co 박막의 자성 특성의 변화를 조사하였다.

## II. 실험

실험은  $1 \times 10^{-10}$  Torr의 기본 압력의 초고진공 챔버에서 행해졌다. InP 기판은 Wafer Technology사의 0.35 mm 두께의 undoped n-InP(001) wafer를  $5 \times 10 \text{ mm}^2$  크기로 사용하였다. InP(001) 기판은 먼저  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 4 : 1 : 1$ 의 용액에 화학적으로 에칭을 한 후에, 초음파 세척기를 작동시키면서 에탄올에 세척하였다. 화학적으로 세척된 기판은 Ta 막(foil)을 이용하여 Mo 판 위에 고정된 후, 초고진공 챔버로 넣어진다. InP 기판은 Ar 분압  $2 \times 10^{-7}$  Torr에서 300 eV의 에너지로  $\text{Ar}^+$  이온 때려내기를 행한 후, 400°C의 온도에서 불림하는 과정을 반복적으로 실행하였다. 때려내기와 불림의 매 시행마다 반사 고에너지 전자 회절(reflection high energy electron diffraction, RHEED)을 통해 구조의 변화를 보았고, 이러한 과정을 통해 얻어진 InP(2×4) 재구성된 표면은 주사 터널링 현미경(scanning tunneling microscope, STM)을 사용하여 최종적으로 확인된다. Co는 초고진공 챔버에서 수냉식 전자사출 증착기(e-beam evaporator)를 통하여 0.4 ML/min의 비율로 증착하였으며, 이 때 진공은  $5 \times 10^{-10}$  Torr로 유지되었다. Co는 단층 단위로 InP 기판 위에 증착되었으며, Co 박막의 자성적 특성은 표면 SMOKE 시스템을 통해 측정하였다. 이 실험에서 사용된 SMOKE 시스템의 자세한 설명은

\*Tel: (042) 869-2528, E-mail: scshin@kaist.ac.kr

다른 논문에 자세히 설명되어 있다[9]. 증착과 SMOKE 측정은 모두 상온에서 실시간(*in-situ*)으로 행하였다.

### III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1(a)는 때려내기과 불림 과정을 통해 만들어진, 원자 크기 정도로 편평한 InP(2×4) 재구성된 표면의 STM 영상이다. 그림에서처럼 [110] 방향의 열이 평행으로 규칙적인 배열

을 이루고 있다는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 1(a)의 중앙 부분에서 terrace step이 나타나는 것을 관찰할 수 있으며, 이 때 terrace step의 크기, 즉 윗면과 아랫면의 높이차는 0.3 nm 정도로 원자층 크기에 해당한다. Fig. 1(b)는 30×30 nm<sup>2</sup> 크기로 InP(2×4) 표면의 확대된 영상이다. 각각의 열은 구형의 입자들의 규칙적인 배열에 의해 이루어져 있다는 것을 확인할 수 있으며, 이 때 이 입자는 지름 0.8 nm 정도의 크기로, 이는 이 입자가 원자 몇 개가 합쳐져 있는 집합체라는 것을 의미한다. 그리고 각 집합체는 [110] 방향을 따라 약 0.9 nm의 거리만큼 떨어져 있다, 이는 bulk InP에서 두 개의 인접한 양이온 사이의 거리의 2배에 해당하는 값으로 InP(2×4)에서 2의 주기를 나타낸다. 또한 이웃한 두 열 사이의 거리는 약 1.8 nm로, 이는 InP(2×4)에서 4의 주기에 대응된다. 따라서 Fig. 1(b)에 표시한 사각형과 같이(2×4)의 기본 단위가 형성된다. 현재 원자 크기 정도로 편평한 InP 재구성된 표면 중(2×1)과 (2×4) 표면이 가장 많이 연구되어 왔으나 MOVPE(metal organic vapor epitaxy) 시스템을 이용하여 만들어진 InP(2×1) 재구성된 표면의 경우엔 H<sub>2</sub>가 흡착되어 실제로는 깨끗하지 않은 표면으로 알려져 있다[10, 11]. 이에 반해 때려내기과 불림을 통해서 얻은 In-rich InP(2×4) 재구성된 표면의 경우엔 원자 크기 정도로 편평한 InP 표면을 형성하는 것으로 알려져 있다[12, 13]. InP(2×4) 재구성된 표면의 원자 구조에 대해서도 지금까지 많은 연구가 되어 있다. 현재까지 P 삼합체 모형(trimer model)[14], In 이합체 모형(dimer model)[12], P 이합체 모형[15], 그리고 In-P 혼합 이합체 모형[16] 등 여러 가지 구조가 제시되어 있으며, 이론적인 계산에 따르면 In-rich InP(2×4) 구조의 경우 In-P 혼합 이합체를 형성하는 것이 안정하다고 보고 되고 있다[17].

이렇게 형성한 InP 표면 위에 Co 박막을 단층 단위로 증착을 하고 가로 방향(longitudinal)과 수직 방향(polar) SMOKE 측정을 하였다. Fig. 2(a)와 (b)는 각각 상온에서 단층 간격으로 측정된 SMOKE data 중 4, 8, 12, 16, 20 ML에서의 longitudinal SMOKE와 polar SMOKE의 Kerr rotation을 보여준다. Longitudinal SMOKE 측정 시 자기장은[110] 방향으로 걸어주었다. Fig. 2(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 증착을 시작한 후에 수 ML까지는 longitudinal SMOKE나 polar SMOKE 측정 모두에서 자성 신호를 발견할 수 없었다. 이에 대한 원인으로 Co가 InP 표면 위에 성장하면서 순수한 Co로 성장하는 것이 아니라 표면 근처에서 확산이 발생하여 Co가 In 혹은 P와 섞이면서 비자성 화합물을 형성하고 결과적으로 자성 특성이 나타나지 않는 것을 생각할 수 있다. 또는 Co가 작은 무더기(cluster)로 성장하는 경우를 생각할 수 있다. 즉 Co가 InP 위에 성장할 때 강자성 특성이 나타나지 않는 작

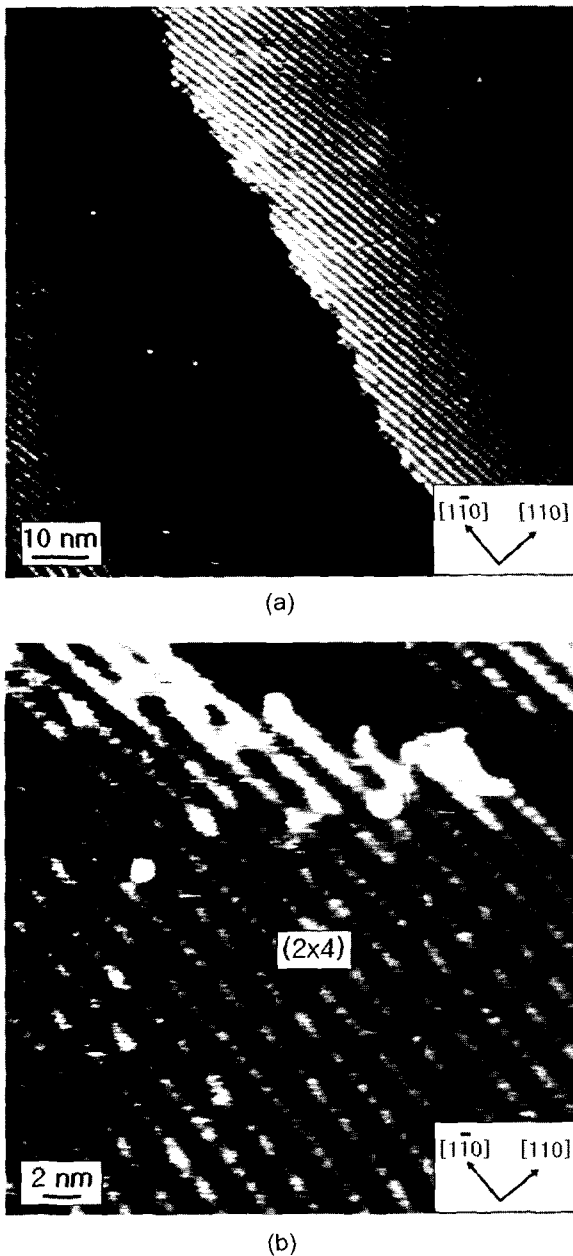


Fig. 1. InP(001)(2×4) reconstruction surface by sputtering-and-annealing process: (a) 100×100 nm<sup>2</sup> STM image showing flat terraces; (b) 30×30 nm<sup>2</sup> STM image showing (2×4) unit cell.

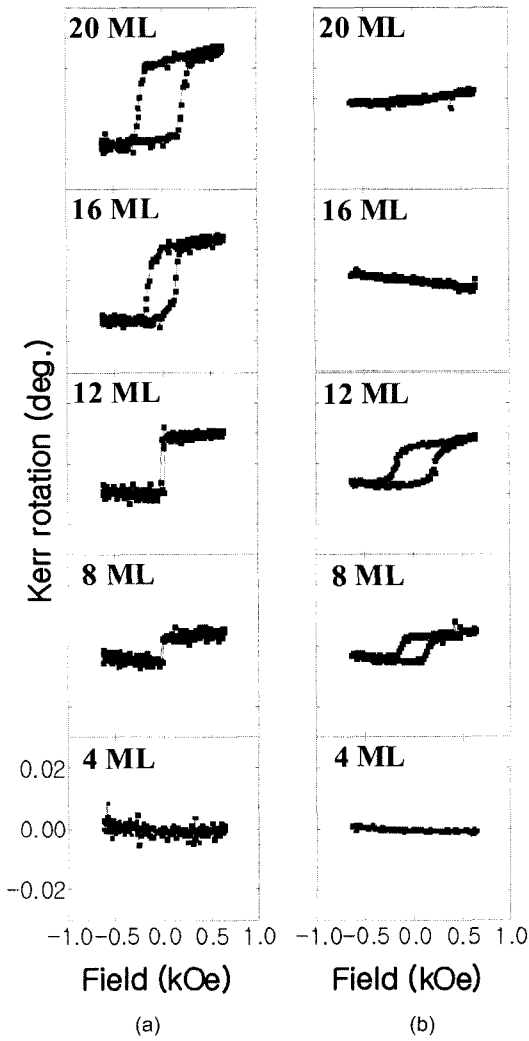


Fig. 2. (a) Longitudinal and (b) polar SMOKE results of Co thin film deposited on InP(001)(2 × 4) reconstructed surface.

은 무더기 형태로 자라 자성적 정렬(magnetic ordering)이 일어나지 않아 자성 특성이 나타나지 않을 수도 있다.

Co 박막의 두께가 8 ML에 이르게 되면 longitudinal SMOKE와 polar SMOKE 측정에서 모두 자기이력곡선이 나타나기 시작한다. 특히 이 두께에서 자기이력곡선의 보자력 값은 longitudinal SMOKE 측정 때보다 polar SMOKE 측정에서 더욱 큰 값을 갖게 된다. Co 박막의 두께가 8 ML일 때 longitudinal SMOKE의 신호와 polar SMOKE 신호의 보자력 값은 각각 6.4 Oe와 136 Oe로서 polar SMOKE 신호가 longitudinal SMOKE 신호에 비해서 약 20배 정도로 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Co 박막의 두께가 증가하여 15 ML가 될 때까지 유지되며, 이 두께에서 longitudinal SMOKE와 polar SMOKE 신호의 보자력 값은 각각 17 Oe와 305 Oe 값에 이르게 된다. 또한 8 ML에서

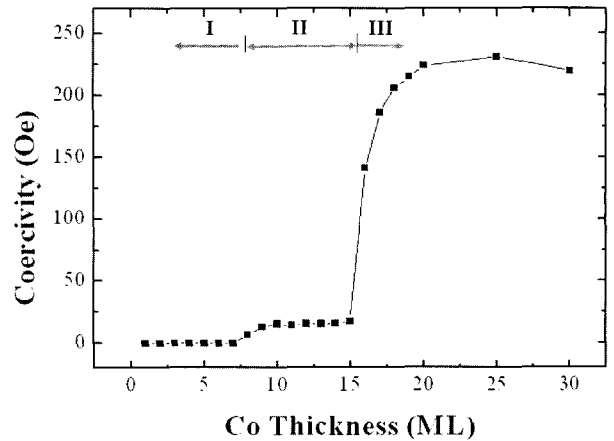


Fig. 3. Dependence of the coercivity on the Co thickness from the longitudinal SMOKE measurements.

15 ML의 Co 두께 영역에서 특히 longitudinal과 polar SMOKE 측정 모두에서 사각형의 자기이력곡선이 나타났다는 것에 주목할 필요가 있다. 두 측정 모두에서 사각형의 자기이력곡선이 나타났다는 것은 스핀 방향이 수평 성분과 수직 성분을 모두 갖는다는 것을 의미한다. 즉, 이 두께 영역에서 수평 자기 이방성과 수직 자기 이방성이 공존하는 준안정상이 형성된다는 것을 나타낸다[18, 19].

Co를 계속 증착하여 두께가 16 ML가 되면 polar 측정의 자기이력곡선은 사라지고 longitudinal SMOKE 신호에서만 자기이력곡선이 나타나게 된다. 이 때 longitudinal SMOKE 신호의 보자력은 16 ML에서 갑작스럽게 증가하여 140 Oe의 값을 가지며, 25 ML에서 230 Oe의 값까지 증가하다가 30 ML에서 220 Oe로 다소 감소하는 경향을 보이게 된다. 특히 이전 15 ML의 두께에서는 longitudinal SMOKE와 polar SMOKE 신호 모두 사각형의 자기이력곡선을 보이다가 16 ML에서부터는 longitudinal SMOKE 신호만 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 16 ML가 되면서 스핀의 방향의 전이가 발생해서 수평 방향 성분만을 갖게 됨을 말한다. 즉, 16 ML의 Co 두께에서 스핀의 방향 전이가 발생해서 이전의 수평 및 수직 자기 이방성이 공존하는 준안정상에서 수평 자기 이방성을 갖는 상태로 변화가 일어난다는 것을 의미한다.

이러한 Co/InP 시스템에서 Co 두께에 따른 자기적 성질의 변화를 명확히 보기 위해, Co 두께에 따른 보자력 값의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보듯이 longitudinal SMOKE 결과에서 얻어진 Co 두께에 따른 보자력 값으로부터 자성 특성이 다른 세 가지 영역이 존재함을 보다 확실히 확인할 수 있다: (I) 자성 특성이 나타나지 않는 7 ML까지의 두께 영역, (II) 자성 특성이 나타나기 시작하고 6.4 Oe에서 17 Oe의 작은 보자력 값을 가지는 8 ML에서 15 ML까지의 영역, 그리고 (III) 보자력 값이 이전의 두께

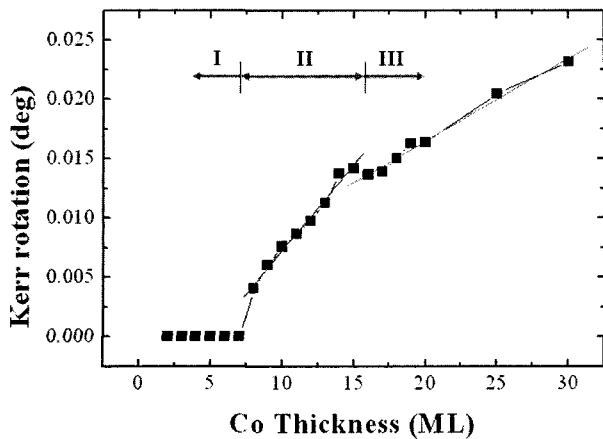


Fig. 4. Dependence of the Kerr rotation on the Co thickness from the longitudinal SMOKE measurements.

영역에 비해서 큰 값인 140 Oe를 갖기 시작하면서 최대 230 Oe까지 갖는 16 ML에서 30 ML까지의 영역(영역 III)이 그것이다.

Fig. 3에서 나타난 자성 특성이 다른 세 가지 영역은 longitudinal SMOKE 결과로부터 Co 박막의 두께에 따른 Kerr rotation을 나타낸 Fig. 4에서도 잘 나타난다. 자성 특성이 나타나지 않는 처음 7 ML까지의 두께 영역의 경우는 그림에서처럼 Kerr rotation의 값이 0으로 나타난다. 두 번째 영역은 8 ML에서부터 15 ML에 해당하는 영역으로 선형 fitting을 한 직선에서 보듯이 Kerr rotation이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또 Co 박막의 두께가 16 ML가 되었을 때 이전의 Kerr rotation의 증가 추세와는 다르게 Kerr rotation에서 일시적 감소가 나타난다. 그 후 박막이 더욱 두꺼워짐에 따라 Kerr rotation 값이 다시 선형적으로 증가하지만 이전 영역보다는 기울기가 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 4에서도 두께에 따라 Kerr rotation 값의 변화가 Co 두께에 따라 세 영역으로 나누어진다는 것을 알 수 있고, 이 때의 세 영역은 Fig. 3의 두께에 따른 보자력 값의 변화에서 나누었던 세 영역과 일치한다는 것을 알 수 있다. 현재까지 Co/InP 시스템에 대해 이루어진 연구는 없었으며, InP와 유사한 III-V족 반도체인 GaAs 위에 Co를 증착할 경우 GaAs와의 경계면 근처에서는 bcc 구조로 성장하다가 두께가 두꺼워짐에 따라 hcp 구조를 갖는 것으로 보고 되고 있다[20]. 따라서 Co/InP 박막의 두께에 따라서 자성 특성이 세 영역으로 구분 되는 물리적 원인으로 Co 박막이 InP 위에 성장할 때 Co/GaAs 경우와 같이 두께에 따라 구조적 변화가 일어나는 것을 고려할 수 있다. Co/InP 박막에서 두께에 따른 Co 박막의 구조변화에 관한 연구는 현재 XRD 및 고분해능 단면 TEM 등을 이용하여 연구 중에 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 원자층 정도로 편평한 InP(2×4) 재구성된 표면 위에 Co 박막을 단층 단위로 증착하면서 실시간으로 Co 박막의 자성 특성을 조사하였다. 박막의 특성은 Co의 두께에 따라 크게 세 가지 영역으로 구분할 수 있었다. 자성 특성이 나타나지 않는 7 ML까지의 영역, longitudinal SMOKE와 polar SMOKE 측정에서 모두 자기이력곡선이 나타나는 8 ML에서 15 ML까지의 영역, 그리고 polar SMOKE 신호는 사라지고 longitudinal SMOKE 신호만 나타나는 16 ML 이상의 두께 영역이 그것이다. longitudinal SMOKE 결과로부터 Co 두께에 따른 보자력 값과 Kerr rotation의 결과에서도 이러한 세 영역이 나타남을 확인할 수 있었다. 이렇게 구분되는 자성 특성을 다른 두께 영역이 나타나는 원인은 InP 위에 Co를 증착할 때 경계면 근처에서 Co 박막이 구조적인 변화로부터 기인하는 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Datta and B. Dass, Appl. Phys. Lett. 56, 665 (1990).
- [2] G. A. Prinz, Phys. Today 48(4), 58 (1995).
- [3] A. T. Hanbicki, B. T. Jonker, G. Itsukos, G. Kioseoglou, and A. Pertou, Appl. Phys. Lett. 80, 1240 (2002).
- [4] H. J. Zhu, M. Ramsteiner, H. Kostial, M. Wassermeier, H.-P. Schonherr, and K. H. Ploog, Phys. Rev. Lett. 87, 016601 (2001).
- [5] R. Fiederling, M. Keim, G. Reuscher, W. Ossau, G. Schmidt, A. Waag, and L.W. Molenkamp, Nature (London) 402, 787 (1999).
- [6] Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno, and D. Awschalom, Nature (London) 402, 790 (1999).
- [7] M. Meyer, Compd. Semicond. 3, 30 (1997).
- [8] S. S. P. Parkin, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 1641
- [9] J.-W. Lee, J.-R. Jeong, D.-H. Kim, J.S. Ahn, J. Kim, and S.-C. Shin, Rev. Sci. Instrum. 71, 3801 (2000).
- [10] L. Li, B. -K. Han, Q. Fu, and R. F. Hicks, Phys. Rev. Lett. 82, 1879 (1999).
- [11] W.G. Schmidt, P. H. Hahn, and F. Bechstedt, N. Esser, P. Vogt, A.Wange, and W. Richter, Phys. Rev. Lett. 90, 126101 (2003).
- [12] M. M. Sung, C. Kim, H. Bu, D. S. Karpuzov, and J. W. Rabalais, Surf. Sci. 322, 116 (1995).
- [13] D. Pahlke, J. Kinsky, Ch. Schultz, M. Pristovs M. Zorn, N. Esser, and W. Richter, Phys. Rev. B 56, R1661 (1997).
- [14] C. D. MacPherson, R. A. Wolkow, C. E. J. Mitchell, and A. B. McLean, Phys. Rev. Lett. 77, 691 (1996).
- [15] N. Esser, U. Resch-Esser, M. Pristovsek, and W. Richter, Phys. Rev. B 53, R13257 (1996).
- [16] J. -M. Jin and L. J. Lewis, Surf. Sci. 325, 251 (1995).

[17] W. G. Schmidt, and F. Bechstedt, Surf. Sci. **409**, 474 (1998).

[18] Yonko Millev, and Jrgen Kirschner, Phys. Rev. B **54**, 4137 (1996).

[19] Jeong-Won Lee, Jonggeol Kim, San-Koog Kim, Jong-Ryul

Jeong, and Sung-Chul Shin, Phys. Rev. B **65** 144437 (2002).

[20] M. A. Mangan, G. Spanos, T. Ambrose, and G. A. Prinz, Appl. Phys. Lett. **75**, 346 (1999).

## Magnetic Properties of Monolayer-thickness Co Film on InP(001) (2×4) Reconstruction Surface

Yong-Sung Park, Jong-Ryul Jeong, Jeong-Won Lee, and Sung-Chul Shin\*

*Department of Physics and Center for Nanospinics of Spintronic Materials,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea*

(Received 7 April 2004, in final form 18 June 2004)

We have investigated magnetic properties of monolayer (ML)-thickness Co film deposited on InP(2 × 4) reconstruction surface using *in situ* Surface Magneto-Optical Kerr Effects (SMOKE) measurement system. InP(2 × 4) reconstruction surface, obtained by repeated sputtering and annealing, was confirmed by reflection high energy electron diffraction (RHEED) and scanning tunneling microscope (STM) measurements. From both longitudinal and polar SMOKE measurements, we have observed three distinguishable regions showing different magnetic properties depending on the Co thickness. In the Co film thickness smaller than 7 ML, no SMOKE signal was detected. In the following thickness between 8 ML and 15 ML, both longitudinal and polar Kerr hysteresis loops were observed, which implies a metastable phase coexisted of in-plane and perpendicular anisotropies. In the film thickness larger than 16 ML, only longitudinal MOKE signal without polar signal was detected, which implies existence of in-plane anisotropy in this thickness region.

**Key words** : InP(2×4) substrate, STM, SMOKE, Co film